

**В.М. Труханов**  
**А.М. Матвеев**

# **НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

**Под редакцией В.М. Труханова**



**Москва**  
**Издательский дом "СПЕКТР"**  
**2016**

**В.М. Труханов  
А.М. Матвеевко**

# **НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

**Под редакцией В.М. Труханова**

**2-е издание**



**Москва  
2016**

УДК 621.192

ББК 30.14

Т80

Рецензент  
академик РАН В.В. Ключев

**Труханов В.М., Матвеевко А.М.**

Т80 Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла. – 2-е изд. М. : ООО «Издательский дом «Спектр», 2016. – 664 с.  
ISBN 978-5-4442-0108-4

Рассмотрены теоретические и практические вопросы надежности сложных систем на всех этапах их жизненного цикла. Приведены методы достижения и обеспечения надежности на этапах проектирования, серийного производства, эксплуатации и на продленном сроке эксплуатации. Представлены математические модели построения кривых роста надежности пассивным методом и с учетом управляющих воздействий, описан новый подход к достижению заданного уровня надежности на этапе создания сложных систем, рассмотрены методы планирования объемов испытания, а также пути повышения надежности конструктивными и технологическими способами, изложены методы продления сроков эксплуатации.

Для специалистов, работающих в области исследования, создания и эксплуатации сложных технических систем, преподавателей и студентов вузов.

УДК 621.192

ББК 30.14

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.*

ISBN 978-5-4442-0108-4

© Труханов В.М., Матвеевко А.М., 2016

© МАИ, 2016

© ВолгГТУ, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Предисловие</b> .....	13
<b>Глава 1. Руководство и организация</b> .....	14
1.1. Ответственность руководства .....	14
1.2. Положение, занимаемое группой надежности на предприятии .....	16
<b>Глава 2. Задачи и организация исследования надежности систем</b> .....	20
2.1. Задачи, возникающие при исследовании надежности систем .....	20
2.2. Анализ конструкции с точки зрения надежности .....	22
2.2.1. Примерный перечень вопросов для анализа конструкции с точки зрения надежности .....	23
2.3. Организация исследований и разработок как основа создания надежных систем .....	25
2.4. Этап разработки технических предложений. Анализ критериев оценки системы .....	26
2.5. Этап эскизного проектирования .....	29
2.6. Этап технического проектирования .....	32
2.7. Общие принципы разработки подвижных установок .....	34
2.8. Принцип размещения оборудования по функциональному назначению .....	38
2.9. Оптимальное построение средств регламентного обслуживания .....	39
<b>Глава 3. Организация системы передачи информации о надежности и ремонтпригодности изделий</b> .....	43
3.1. Сбор, обработка и представление информации о надежности изделий на этапе испытаний опытных образцов .....	43
3.2. Сбор, обработка и представление информации о надежности изделий на этапе серийного производства .....	46
3.3. Цель и организация сбора, обработка и представление информации о надежности и ремонтпригодности изделий на этапе эксплуатации .....	50

3.4. Расчет рассылки данных, анализ информации, составление донесений . . . . .	53
3.5. Анализ информации. Составление донесений . . . . .	57

#### **Глава 4. Математический аппарат. Элементы теории вероятностей и математической статистики . . . . . 59**

4.1. Понятие события. Действия над событиями . . . . .	59
4.2. Частота события. Свойства частот. Статистическая вероятность . . . . .	62
4.3. Аксиомы теории вероятностей . . . . .	65
4.4. Зависимые и независимые события. Теоремы умножения вероятностей для независимых и зависимых событий . . . . .	66
4.5. Формула полной вероятности . . . . .	68
4.6. Формула Байеса . . . . .	70
4.7. Частная теорема о повторении опытов. Формула Бернулли	71
4.8. Случайные величины и законы их распределения . . . . .	73
4.9. Дискретные законы распределения, часто используемые в теории надежности . . . . .	78
4.9.1. Закон Пуассона . . . . .	78
4.9.2. Биномиальное распределение . . . . .	78
4.9.3. Гипергеометрическое распределение . . . . .	79
4.10. Непрерывные законы распределения . . . . .	81
4.10.1. Экспоненциальное распределение . . . . .	81
4.10.2. Распределение Вейбулла . . . . .	82
4.10.3. Нормальное распределение . . . . .	83
4.10.4. Логарифмически нормальное распределение . . . . .	87
4.10.5. Гамма-распределение . . . . .	89
4.10.6. Распределение хи-квадрат ( $\chi^2$ ) . . . . .	91
4.10.7. Распределение по закону равной вероятности . . . . .	93
4.10.8. Распределение Стьюдента (Госсета) . . . . .	95
4.10.9. Бета-распределение . . . . .	96
4.10.10. Распределение смеси и совокупности случайных величин . . . . .	97
4.11. Числовые характеристики случайных величин . . . . .	98
4.12. Некоторые предельные теоремы теории вероятностей . . . . .	107

4.13. Элементы математической статистики и ее основные задачи . . . . .	110
4.14. Точечные оценки параметров распределения . . . . .	111
4.15. Метод максимального правдоподобия . . . . .	112
4.16. Метод моментов . . . . .	113
4.17. Исследование точности оцениваемых параметров методом доверительных интервалов . . . . .	115
<b>4.17.1. Методы проверки статистических гипотез . . . . .</b>	<b>116</b>

<b>5. Исследование надежности технических систем на этапе проектирования . . . . .</b>	<b>121</b>
5.1. Задание требований и выбор номенклатуры показателей надежности . . . . .	121
5.2. Распределение нормируемых показателей надежности по составным частям, входящих в систему . . . . .	123
5.2.1. Метод рационального распределения норм надежности . . . . .	124
5.2.2. Метод равномерного распределения . . . . .	126
5.2.3. Метод пропорционального распределения . . . . .	127
5.2.4. Метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов . . . . .	128
5.2.5. Метод распределения требований по надежности с учетом важности подсистем (составных частей) . . . . .	131
5.3. Типы отказов . . . . .	133
5.4. Показатели надежности невосстанавливаемого элемента . . . . .	135
5.5. Показатели надежности восстанавливаемого элемента . . . . .	139

<b>Глава 6. Теоретические и экспериментальные методы достижения и обеспечения надежности сложных технических систем на всех этапах их жизни . . . . .</b>	<b>147</b>
6.1. Компоненты методов теоретического и экспериментального исследования надежности дорогостоящих объектов . . . . .	147
6.2. Методы расчета надежности дорогостоящих небракуемых объектов типа подвижных установок на этапе проектирования . . . . .	148
6.3. Модель расчета надежности, учитывающая случайные отказы . . . . .	151



---

6.4. Модель расчета надежности, учитывающая неслучайные отказы . . . . .	157
6.5. Модель расчета надежности механических узлов и металлоконструкций . . . . .	158
6.6. Методика расчета и достижения требуемого уровня надежности . . . . .	167
<b>Глава 7. Методы достижения заданного уровня надежности на этапе проектирования . . . . .</b>	<b>171</b>
7.1. Организационные способы разработки, обеспечивающие создание надежных систем . . . . .	171
7.2. Конструктивные способы достижения надежности сложных технических систем . . . . .	173
7.3. Конструктивные критерии и способы достижения надежности системы электроавтоматики . . . . .	175
7.4. Конструктивные критерии и способы достижения надежности металлоконструкций и принципы компоновки изделий . . . . .	178
7.5. Конструктивные критерии и способы достижения надежности гидравлических систем и механических узлов . . . . .	181
7.6. Методы повышения надежности систем за счет различных видов резервирования без учета восстановления резервных элементов . . . . .	183
7.7. Расчет проектной надежности систем с учетом восстановления резервных элементов. . . . .	190
<b>Глава 8. Теоретические и экспериментальные методы создания дорогостоящих объектов с заданным высоким уровнем надежности . . . . .</b>	<b>193</b>
8.1. Аналитический метод расчета управляющих воздействий при создании объектов с высоким уровнем надежности и его математическая модель, выраженная в виде вероятностей . . . . .	193
8.2. Аналитический метод расчета управляющих воздействий, выраженных в виде конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров . . . . .	200
8.3. Методика оценивания управляющих воздействий . . . . .	206
8.4. Математические модели расчета функции надежности на всех этапах жизненного цикла изделия с учетом управляющих воздействий . . . . .	224

---

<b>Глава 9. Исследование надежности изделий на этапе экспериментальной отработки</b> . . . . .	<b>228</b>
9.1. Цель и виды испытаний. . . . .	228
9.2. Организация и последовательность создания сложных систем . . . . .	230
9.3. Программа экспериментальной отработки . . . . .	233
9.4. Контроль уровня оценки выполнения программы экспериментальной отработки . . . . .	235
9.5. Исследовательские испытания опытных образцов . . . . .	237
9.6. Планирование исследовательских и контрольных испытаний методом фиксированного объема . . . . .	242
9.7. Планирование испытаний при экспоненциальном законе распределения наработки для фиксированного объема . . . . .	245
9.8. Планирование испытаний при нормальном и логарифмически нормальном законах распределения наработки на отказ для фиксированного объема . . . . .	250
9.9. Планирование испытаний методом фиксированного объема, когда показателем оценки является вероятность безотказной работы или вероятность отказа, распределенная по биномиальному закону или закону Пуассона . . . . .	254
9.10. Планирование исследовательских и контрольных испытаний методом последовательного анализа . . . . .	257
9.11. Планирование испытаний методом последовательного анализа при двух заданных уровнях показателя надежности для биномиального закона распределения . . . . .	259
9.12. Планирование испытаний методом последовательного анализа для экспоненциального закона распределения . . . . .	262
9.13. Планирование испытаний методом последовательного анализа для закона распределения Пуассона . . . . .	265
9.14. Планирование испытаний методом последовательного анализа при двух заданных уровнях показателя надежности для нормального закона распределения наработки на отказ . . . . .	268
9.15. Планирование испытаний дорогостоящих небракуемых изделий методом последовательного анализа для различных законов распределения при двух заданных уровнях показателя надежности . . . . .	272



9.16. Планирование испытаний дорогостоящих небракуемых изделий методом последовательного анализа для биномиального закона распределения при одном заданном уровне показателя надежности . . . . .	274
9.17. Сравнительный анализ объемов испытаний, полученных методами фиксированного объема и последовательного анализа для различных законов распределения . . . . .	283
9.18. Исследования надежности в утяжеленных режимах испытаний . . . . .	287
9.19. Планирование объемов испытаний с учетом проводимых доработок и ресурсно-временного запаса . . . . .	293

**Глава 10. Исследование надежности изделий при постановке их на производство и в процессе серийного изготовления . . . . .** 301

10.1. Контрольные испытания изделий на этапе подготовки к серийному производству . . . . .	301
10.2. Влияние производственных факторов на качество выпускаемой продукции . . . . .	302
10.3. Номенклатура показателей качества продукции. Влияние показателей технологичности на надежность изделия . . . . .	303
10.4. Методы оценки качества промышленной продукции . . . . .	309
10.5. Контроль качества и надежности изделия на этапах проектирования, производства и эксплуатации . . . . .	311
10.6. Контроль стабильности технологических процессов и оценка их надежности . . . . .	316
10.7. Исследование и оценивание стабильности технологических процессов . . . . .	323
10.8. Систематизация и анализ дефектов и неисправностей изделий в процессе серийного производства. Оценка качества продукции . . . . .	328
10.9. Контроль качества и планирование испытаний изделий серийного и массового производства . . . . .	338

**Глава 11. Исследование надежности изделий на этапе эксплуатации. . . . .** 340

11.1. Исследование проблемы ремонтпригодности изделий машиностроения . . . . .	340
--	-----

---

11.2. Показатели ремонтпригодности изделий . . . . .	344
11.3. Дополнительные показатели ремонтпригодности . . . . .	349
11.4. Обеспечение требований ремонтпригодности изделий при проектировании и изготовлении . . . . .	354
11.5. Обеспечение требований ремонтпригодности изделий в процессе эксплуатации. Система технического обслуживания и ремонта . . . . .	358
11.6. Влияние организационных и технологических факторов технического обслуживания и ремонта на значения показателей ремонтпригодности . . . . .	360
11.7. Материальное обеспечение работ при техническом обслуживании и ремонте по обеспечению работоспособности и ремонтпригодности изделий . . . . .	364
11.8. Анализ статистических данных и оценивание показателей ремонтпригодности изделий по результатам эксплуатации . . . . .	371
<b>Глава 12. Оценка надежности по результатам статистических данных.</b> . . . . .	<b>379</b>
12.1. Требования к методам контроля . . . . .	379
12.2. Оценка показателей надежности на основе параметрических методов . . . . .	380
12.3. Свойства оценок . . . . .	381
12.4. Теоретическое определение оценок параметров, наиболее применимых в теории надежности законов распределения . . . . .	382
12.5. Нахождение приближенных доверительных границ оценок параметров распределений . . . . .	393
12.6. Статистическое нахождение оценок параметров, наиболее применимых в теории надежности законов распределения для различных планов испытаний . . . . .	394
12.7. Точечная оценка надежности и доверительные пределы функции надежности . . . . .	398
12.8. Приближенная оценка надежности и приближенные доверительные пределы функции надежности . . . . .	398
12.9. Приближенные оценки надежности и их доверительные интервалы для некоторых законов распределения . . . . .	400

---

12.10. Точные доверительные пределы для функции надежности в случае экспоненциального распределения, распределения Вейбулла и гамма-распределения . . . . .	405
12.11. Оценивание показателей безотказности на основе параметрических методов . . . . .	409
12.12. Оценивание показателей безотказности на основе непараметрических методов . . . . .	417
12.13. Оценивание показателей безотказности при испытаниях с измерением определяющих параметров . . . . .	421
12.14. Оценивание надежности изделия по результатам испытаний элементов . . . . .	428
<b>Глава 13. Установление законов распределения значений показателей надежности по статистическим данным . . . . .</b>	<b>432</b>
13.1. Графическое представление вероятностей . . . . .	432
13.2. Методы построения статистической функции надежности, гистограммы и вероятностной бумаги . . . . .	434
13.3. Проверка допущений о законах распределения с помощью критериев согласия . . . . .	445
13.4. Критерий $W$ проверки допущений о виде распределения . . . . .	446
13.5. Критерий согласия хи-квадрат ( $\chi^2$ ) . . . . .	451
13.6. Критерий Колмогорова . . . . .	458
13.7. Проверка однородности совокупности двух групп статистических данных по критерию сравнения частот отказов . . . . .	463
13.8. Приближенный критерий значимости, основанный на нормальном распределении . . . . .	466
13.9. Проверка гипотезы о равенстве средних значений из двух нормально распределенных совокупностей оцениваемых величин . . . . .	469
13.10. Сравнение вероятностей отказов по критерию согласия $\chi^2$ (непараметрический случай) . . . . .	472
13.11. Критерий знаков . . . . .	476
13.12. Непараметрический критерий Уилкоксона . . . . .	480
<b>Глава 14. Математические модели изменения уровня надежности технических систем . . . . .</b>	<b>486</b>

---

14.1. Процесс изменения надежности изделия на этапах его жизненного цикла . . . . .	486
14.2. Виды моделей роста надежности. Непараметрическая модель, основанная на биномиальном распределении . . . . .	490
14.3. Тринмиальная модель . . . . .	492
14.4. Параметрические модели роста надежности . . . . .	495
14.5. Многопараметрическая статистическая модель изменения уровня надежности . . . . .	500
14.6. Гиперболическая модель роста функции надежности и другие виды зависимостей . . . . .	502
14.7. Вероятностные модели, основанные на логических предпосылках . . . . .	507
14.8. Математическая модель изменения уровня надежности изделий с учетом управляющих воздействий . . . . .	509
14.9. Методика оценивания управляющих воздействий . . . . .	522
14.10. Математическая модель изменения уровня надежности изделий с учетом управляющих воздействий, выраженных в виде вероятностей . . . . .	541
<b>Глава 15. Пути и методы повышения надежности сложных систем при проектировании, серийном производстве и эксплуатации</b>	<b>557</b>
15.1. Методы отработки конструкций изделий на технологичность . . . . .	557
15.2. Количественные показатели технологичности конструкций . . . . .	561
15.3. Качественная оценка технологичности . . . . .	568
15.4. Влияние атмосферных и климатических условий на надежность изделий . . . . .	571
15.5. Повышение надежности деталей машин упрочняющей поверхностной обработкой . . . . .	579
15.6. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при проектировании . . . . .	580
15.7. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при изготовлении . . . . .	589
15.8. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при эксплуатации . . . . .	592

<b>Глава 16. Методы продления сроков эксплуатации дорогостоящих объектов</b> . . . . .	593
16.1. Расчетно-аналитический метод . . . . .	593
16.2. Экспериментальный метод . . . . .	596
16.3. Вероятностный метод расчета работоспособности изделия в течение продленного срока эксплуатации с учетом фактического технического состояния элементной базы . . . . .	598
<b>Глава 17. Определение предельного срока эксплуатации сложных технических систем по известной фактической наработке</b> . . . . .	600
17.1. Основные понятия и соотношения . . . . .	600
17.2. Показатель «средний остаточный ресурс» и его свойства . . . . .	601
17.3. Оценка остаточного ресурса сложных технических устройств по данным эксплуатации . . . . .	609
Список литературы . . . . .	613
Приложение . . . . .	615